Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 35, 3. 2024. (83-98)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir

Iron&Steel Society of Iran

Investigating the Effect of Adding WS2 Nanosheets on the Microstructure and Mechanical Properties of 5083 Aluminum Alloy Welded by Friction Stir Welding (FSW) Method*

Research Article

Mohammad Alipour[1]

DOI: 10.22067/jmme.2024.85793.1133

1- Introduction

Due to their high strength-to-weight ratio, good formability, and high corrosion resistance, aluminum alloys are widely used in the aerospace, shipbuilding, and railway industries. Friction stir welding is one of the solid state welding methods, which is mainly used for welding metal alloys such as aluminum and magnesium alloys, and now it can also be used for welding polymers. This method has advantages such as low welding temperature, less deformation, less welding defects (eg less porosity, less cracking) and welds with high mechanical properties. Some industries such as automotive and aviation have paid great attention to this process. For example, in the automotive industry, Al/AlMMC has been used to replace cast iron components such as pistons, engine blocks, cylinder heads, brake calipers, and rotors. Recently, several studies have investigated the feasibility of FSW of aluminum matrix composites and it has been found that FSW is successful in producing high-quality welds with no visible defects and homogeneous distribution of reinforcements and improved joint efficiency. To better strengthen the welding area, different nanoparticles can be used to improve the strength of the welding area. If the alloy undergoes heat treatment after welding at a high temperature, the presence of scattered particles inhibits grain growth and even prevents abnormal grain growth. Therefore, the presence of reinforcing particles not only prevents grain growth, but also increases mechanical and tribological properties. In this research, the optimal conditions for producing welds by adding WS2 nanosheets have been investigated. For comparison, a plate with constant welding parameters without adding nanoplates was welded. Mechanical and microstructural properties were evaluated. FSW was performed on AA5083 aluminum alloy, which is a solid solution strengthened/strain hardened Al-Mg-Mn alloy that is widely used due to its special properties.

2- Experimental

In this study, aluminum alloy plate 5083 with dimensions of 160x70x5 mm3 in annealed condition was used. The chemical composition of the alloy is presented in Table 1. The WS2 nanosheets used in this research have purity of 99% with an average particle size of 70 nm. To apply the powder, a groove with a depth of 0.5 mm and a width of 1 mm was created. The plates were put together to form a perfect square.

Rotation speeds of 300, 500 and 700 rpm and advance speed of 14 and 28 mm/min have been used. Then, the sample with the highest tensile strength was selected as the optimal sample, and in this combination, the rotation speed and the forward movement speed were obtained. The effect of passes was also evaluated. The tool was made of hot work steel (H13) with a hardness of HRC 52, shoulder diameter of 20 mm, pin diameter of 6 mm, and pin height of 4.6 mm. To facilitate the material flow during the process and improve the quality, the tilt angle of the rotary tool relative to the z-axis of the milling machine was chosen to be 3 degrees for all samples.

In order to evaluate the microstructure of the weld samples in the cross-section perpendicular to the weld zone, standard metallographic method ASTM E3-01 was used. The samples were metallographed by No. 2000 sandpaper and polished to make the sample surface smooth, and then etched by a solution containing 82 mL of H_2O, 15.5 mL of HNO_3, and 0.5 mL of HF. Unione model optical microscope and scanning electron microscope (SEM) were used to study the microstructure of the samples. In addition, grain size measurements were performed using image analysis. Vickers microhardness of the samples was measured using Buehler equipment by applying a load of 200 grams for 15 seconds. The tensile test was performed at ambient temperature by a SANTAM 150 tensile machine with a strain rate of s-10.003. The dimensions of the tensile test samples were based on the ASTM-E8-04 standard. Figure 1 shows the size and configuration of the welded tensile specimen.

Manuscript received: December 9, 2023, Revised, December 31, 2023, Accepted, June 12, 2024.

[1] Corresponding author: Assistant professor, Faculty of Mechanical engineering, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Iran. **Email:** alipourmo@tabrizu.ac.ir

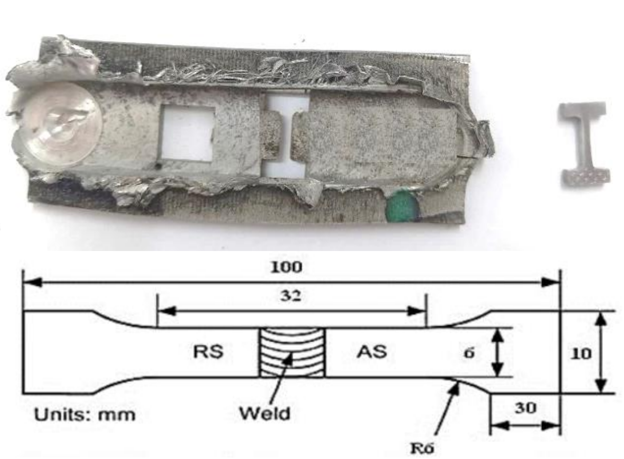


Figure 1- Welded sample and wire cut tensile sample from the welding site.

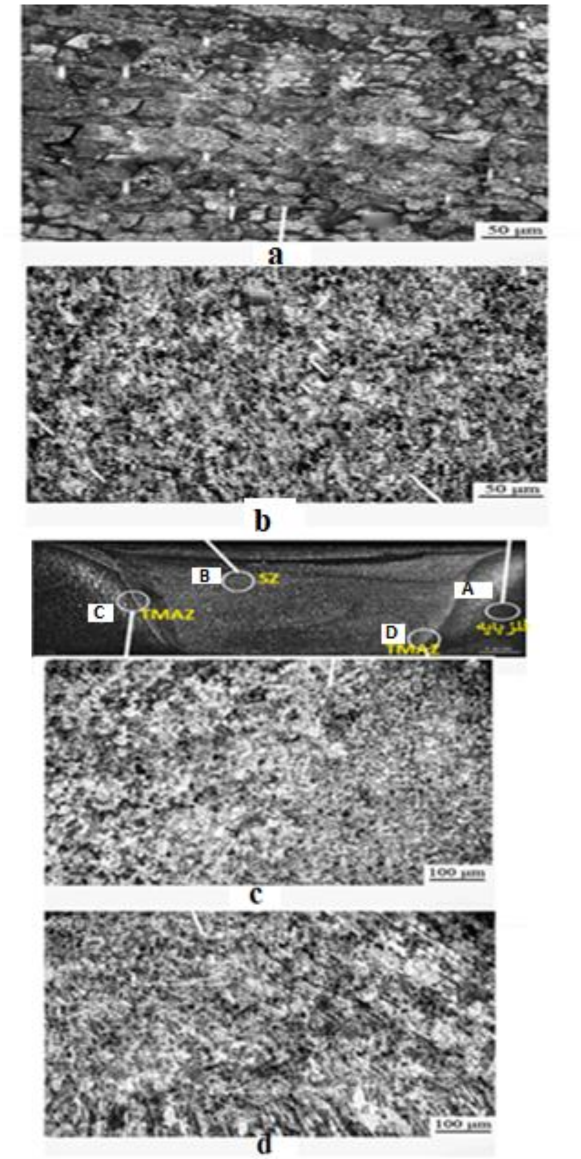


Fig. 2 Cross-sectional image of the specimen FSW with four pass (a) base metal, (b) stir zone (SZ), (c) and (d) thermo mechanically affected zone (TMAZ).

3- Results and Discussion

Figure 2 shows the light microscope image of the cross-section of the welded surface after four passes that distinguishes the different regions. The intense plastic deformation and heat generated by friction during the friction stirring process produce a recrystallized microstructure with very fine grains in the SZ. This region is commonly known as the dynamically recrystallized region. The stirred zone is shown in Figure 2-b. There is usually a low dislocation density in the recrystallized grains.

Figure 3 shows the microhardness profile along the mid-thickness of the FSW cross-section for different samples. The maximum hardness of 135 Hv was observed in a 10 mm wide area around the center line of the weld for the sample with four passes and with WS2 nanoparticles. This hardness corresponds to the end of the SZ zone and the beginning of the TMAZ zone. Figure 4 shows the tensile test results for the base sample.

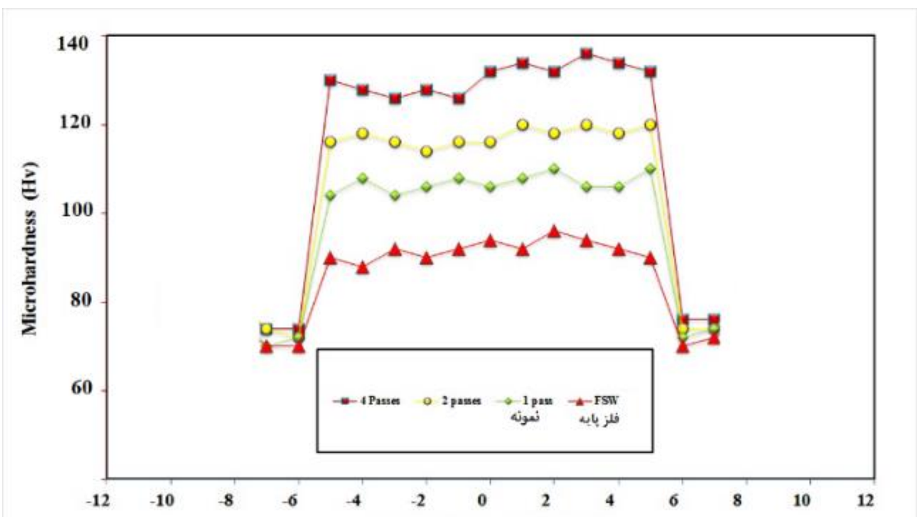


Figure 3- Hardness profile of the sample after friction stir welding.

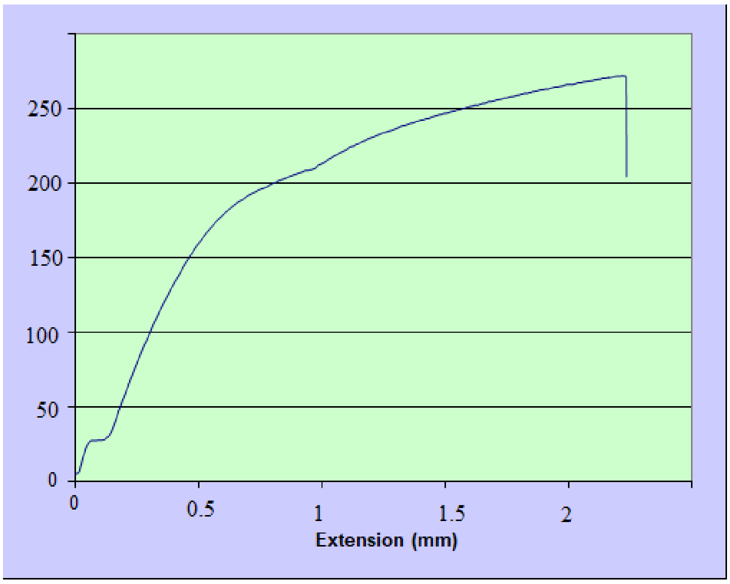


Figure 4- Tensile test result for the base sample.

4- Conclusion

In this study, the effects of the number of welding passes on the microstructure and mechanical properties of butt weld joints of aluminum alloy 5083 by friction stir welding with the addition of WS2 nanoplates to the weld groove have been investigated. The microstructure and mechanical properties such as tensile strength and microhardness were investigated and the following results were obtained:

1. The maximum hardness value in the whole sample is assigned to the mechanically deformed area, which increases as the grain size decreases.
2. In the welding samples without reinforcing powder, the minimum amount of hardness and strength is obtained, but with the addition of reinforcing nanoparticles, the mechanical properties are improved.
3. The amount of hardness and tensile strength increases with the increase in the number of welding passes and is higher than the sample that was welded without nano powder. The reason is a more uniform distribution of particles in the field and locking conditions, which reduces the grain size. The best result is attributed to the sample welded by four welding passes.

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/

انجمن آهن و فولاد ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

بررسی تأثیر افزودن نانوصفحات WS2 بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ جوش داده شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)*

مقاله پژوهشی

محمد علی پور[۱]

DOI: 10.22067/jmme.2024.85793.1133

چکیده *این مطالعه با هدف بررسی تعداد پاس و افزودن نانو صفحات WS2 به اتصالات جوش لب به لب اصطکاکی اغتشاشی (FSW) آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ بر ریزساختار و خواص استحکامی و سختی انجام شده است. در ابتدا از ترکیب دو عامل سرعت دورانی و سرعت پیشروی استفاده شده و نمونه بهینه در مورد عدم وجود عیوب سطحی و متالورژیکی و حداکثر مقدار مقاومت کششی نهایی انتخاب شده است. سپس FSW با افزودن و یا بدون افزودن نانو صفحات WS2 برای تعداد پاس مختلف انجام شد. مشاهدات ریزساختاری نشان داد که اندازه دانه در ناحیه همزده با افزایش تعداد پاس‌های جوش کاهش یافته و توزیع یکنواخت ذرات حاصل شده است. همچنین استفاده از جوش چهار پاس پیوسته با سرعت دورانی چرخشی ۷۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۴ میلی‌متر بر دقیقه، باعث افزایش ۵۲ MPa در استحکام کششی و ۳۵ Hv در مقدار سختی نسبت به نمونه بدون افزودن نانو صفحات می‌شود.*

واژه های کلیدی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، تعداد پاس جوش، خواص مکانیکی، ریزساختار.

Investigating the Effect of Adding WS2 Nanosheets on the Microstructure and Mechanical Properties of 5083 Aluminum Alloy Welded by Friction Stir Welding (FSW) Method

Mohammad Alipour

Abstract *This study aims to investigate the number of passes and the addition of WS2 nanoplates to friction stir welding (FSW) joints of aluminum alloy 5083 on the microstructure, strength and hardness properties. At first, the combination of the two factors of rotational speed and forward speed was used and the optimal state was selected in the absence of surface and metallurgical defects and the maximum value of the final tensile strength. Then FSW was performed with or without the addition of WS2 nanoplates for different pass numbers. Microstructural observations showed that the grain size in the stirred area decreased with the increase in the number of welding passes and a uniform distribution of particles was obtained. Also, the use of continuous four-pass welding with a rotational rotational speed of 700 rpm and forward speed of 14 mm/min increases the tensile strength by 52 MPa and 35 Hv in the hardness value compared to the sample without the addition of nanoplates.*

Keywords Friction stir welding, Weld pass numbers, Mechanical properties, Microstructure.

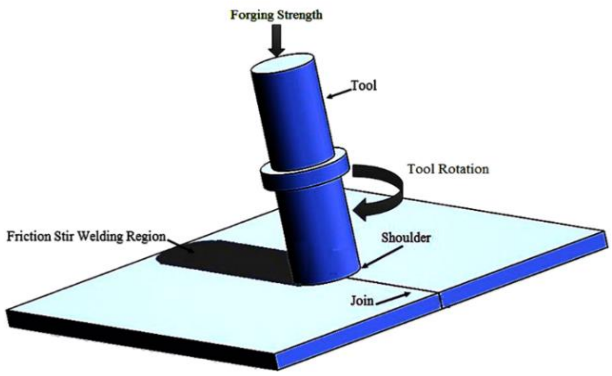
* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۹/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۳/۲۳ می‌باشد.

(۱) استادیار، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

Email: alipourmo@tabrizu.ac.ir

مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، شکل پذیری خوب و مقاومت در برابر خوردگی بالا، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع هوافضا، کشتی سازی و راه آهن دارند. با افزایش کاربرد آلومینیوم در صنایع مختلف، اهمیت اتصال قطعات آلومینیومی افزایش یافته است. از سوی دیگر، استفاده از روش-های جوشکاری حالت جامد برای جوشکاری آلیاژهای فلزی، به‌ویژه آلومینیوم، در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری داشته است [1]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از روش‌های جوشکاری حالت جامد است که عمدتا برای جوشکاری آلیاژهای فلزی مانند آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم استفاده می‌شود و اکنون در جوشکاری پلیمرها نیز قابل استفاده است. این روش توسط تویی در سال ۱۹۹۱ ثبت شد [2]. FSW با سایر روش‌های جوشکاری مبتنی بر ذوب مواد که یک فناوری اتصال حالت جامد است، متفاوت است. این روش مزایایی مانند دمای جوش پایین، تغییر شکل کمتر، عیوب جوش کمتر (به عنوان مثال تخلخل کمتر، ترک کمتر) و جوش‌هایی با قابلیت‌های مکانیکی بالا دارد [3]. شکل (۱) شماتیکی از روش FSW را نشان می‌دهد. برخی از صنایع مانند خودروسازی و هوانوردی توجه زیادی به این فرآیند داشته‌اند. به عنوان مثال، در صنعت خودرو، Al/AlMMC برای جایگزینی اجزای چدنی مانند پیستون، بلوک موتور، سرسیلندر، کالیپر ترمز و روتور استفاده شده است [4,5]. اخیرا، چندین مطالعه امکان‌سنجی FSW کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم را بررسی کرده‌اند و مشخص شده است که FSW در تولید جوش‌های باکیفیت بدون نقص قابل مشاهده و توزیع همگن تقویت کننده‌ها و بهبود راندمان اتصالات موفق است [6-11]. برای تقویت بهتر ناحیه جوشکاری می توان از نانوذرات مختلف برای بهبود استحکام ناحیه جوش استفاده کرد. اگر آلیاژ تحت عملیات حرارتی پس از جوشکاری در دمای بالا قرار گیرد، وجود ذرات پراکنده رشد دانه را مهار کرده و حتی از رشد غیرعادی دانه جلوگیری می‌کند [12]. سعیدی و همکاران [13] اثرات نانوذرات آلومینا بر رفتار مکانیکی و خوردگی اتصالات آلیاژهای آلومینیوم ۵۰۵۳ و ۷۰۷۵ را بررسی کرده‌اند. این نویسندگان گزارش کردند که خواص مکانیکی و خوردگی اتصالات جوش داده شده با افزودن ذرات تقویت کننده آلومینا بهبود یافته است. فنگ و همکاران [14] قطعات کامپوزیتی Al2009/SiC را که توسط متالورژی پودر تولید می‌شوند با موفقیت جوش دادند و گزارش کردند که توزیع ذرات تقویت‌کننده و در نتیجه سختی و استحکام کششی با استفاده از FSW بهبود یافته است. چشینین و همکاران [9] گزارش کردند که سختی کامپوزیت پایه آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با ذرات تقویت کننده آلومینا با استفاده از FSW به دلیل پیری بیش از حد کاهش یافته است. لامبارد و همکاران [15] پارامترهای فرآیند FSW را برای به حداقل رساندن عیوب و به حداکثر رساندن عمر خستگی در آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳–H321 بهینه کردند. یک رابطه نزدیک بین استحکام کششی و عملکرد خستگی وجود دارد و بنابراین اتصال باید عاری از بروز انواع خاصی از نقص باشد و دارای خواص مکانیکی قابل قبولی باشد. در مقاله دیگری، بیسادی و همکاران [16] تأثیر سرعت‌های چرخشی و جوشکاری را بر ریزساختارها و خواص مکانیکی Al5083 جوش داده شده با اصطکاکی اغتشاش و اتصالات لبه ورق‌های مس خالص تجاری بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین مقدار تنش‌های کششی نهایی حدود ۷۸ درصد مس و همچنین حدود ۷۴ درصد از مواد اولیه ورق‌های آلومینیومی بود. بنابراین وجود ذرات تقویت کننده نه تنها از رشد دانه جلوگیری می‌کند، بلکه خواص مکانیکی و تریبولوژیکی را نیز افزایش می‌دهد، در این تحقیق ابتدا شرایط بهینه برای تولید جوش‌هایی با افزودن نانوصفحات WS2 بررسی شده است. برای مقایسه، صفحه‌ای با پارامترهای جوش ثابت و بدون افزودن نانوصفحات جوش داده شده است. خواص مکانیکی و ریزساختاری مورد ارزیابی قرار گرفت. FSW بر آلیاژ آلومینیوم AA5083 انجام شد که یک آلیاژ Al-Mg-Mn تقویت شده با محلول جامد و سخت شده/تثبیت شده با کرنش است که به دلیل خواص ویژه آن به طور گسترده استفاده می‌شود و در سال های اخیر، همانطور که در بالا ذکر شد، مقالات متعددی در مورد آن منتشر شده است [17-20].



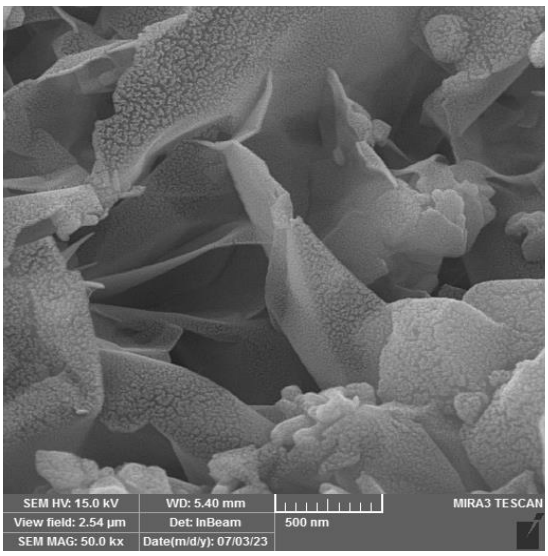
شکل ۱ شماتیک کل فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

روش تحقیق

در این مطالعه از صفحه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ با ابعاد ۱۶۰×۷۰×۵ mm^3 در شرایط آنیل شده استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ در جدول (۱) ارائه شده است. نانوصفحات WS2 مورد استفاده در این تحقیق با خلوص ۹۹ درصـــد با اندازه متوســـط ذرات ۷۰ نانومتر می باشد که تصویر این نانوصفحات در شکل (۲) نشان داده شده است. برای اعمال پودر، شیاری به عمق ۰٫۵ میلی متر و عرض ۱ میلی متر ایجاد شد. صفحات کنار هم قرار گرفتند و بدین ترتیب یک مربع کامل ایجاد شد.

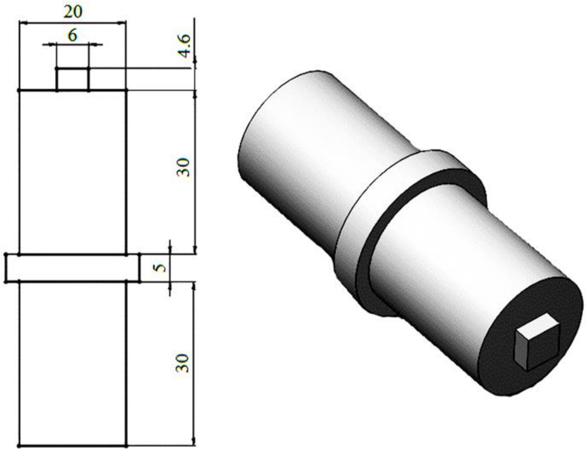
جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ Al ۵۰۸۳ به عنوان ماده پایه

Substance	Al	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti
Wt.%	Bal	4.3	0.1	0.33	0.05	0.64	0.02	0.03



شکل ۲ تصویر FESEM از نانوصفحات WS2

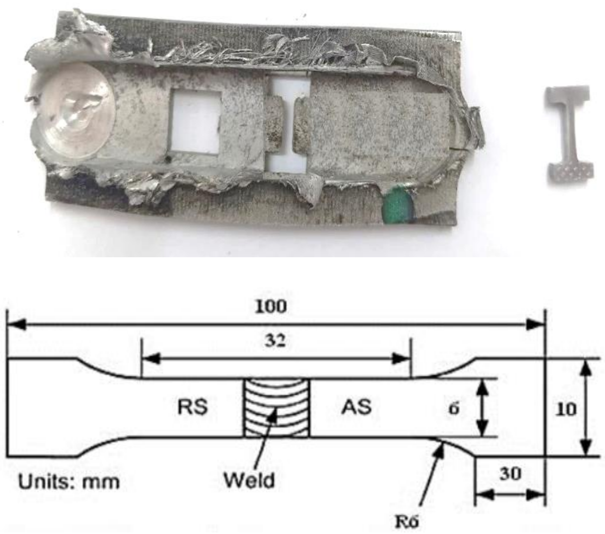
از ســـرعت های چرخش دورانی ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ دور بر دقیقه و ســـرعت حرکت پیشـــروی ۱۴ و ۲۸ میلی متر بر دقیقه استفاده شده است. سپس نمونه با بالاترین استحکام کششی به عنوان نمونه بهینه انتخاب شد و در این ترکیب سرعت چرخش دورانی و سرعت حرکت پیشروی بدست آمد. همچنین اثر پاس ها مورد ارز یابی قرار گر فت. ابزار از فولاد کار گرم (H13) ساخته شد که دارای سختی ۵۲ HRC و قطر شانه آن ۲۰ میلی متر، قطر پین ۶ میلی متر و ارتفاع پین ۴٫۶ میلی متر انتخاب شد. برای تســـهیل جریان مواد در طول فرآیند و بهبود کیفیت، زاویه شیب ابزار دوار نسبت به محور z دستگاه فرز برای همه نمونه‌ها ۳ درجه انتخاب شد. شکل (۳) یک نمای شماتیک از اندازه و پیکربندی ابزار را نشان می دهد.



شکل ۳ هندسه ابزار استفاده شده در این تحقیق

به منظور ارزیابی ریزســـاختار نمونه های جوش در مقطع عمود بر ناحیه جوش از روش اســـتاندارد متالوگرافی ASTM E3-01 استفاده شد. نمونه ها توسط کاغذ سنباده شماره ۲۰۰۰ متالوگرافی شدند و برای صاف شدن سطح نمونه پولیش شدند و ســـپس توســـط محلولی که حاوی ۸۲ میلی لیتر H_2O، 15.5 میلی لیتر HNO^3 و 0.5 میلی لیتر HF اچ شـــدند. برای مطالعه ریزســـاختار نمونه ها از میکروســـکوپ نوری مدل Unione و میکرو سکوپ الکترون روبشی (SEM) استفاده شد. علاوه بر این، اندازه‌گیری اندازه دانه با استفاده از آنالیز تصویر انجام شد. ریزســـختی ویکرز نمونه ها با اســـتفاده از تجهیزات Buehler با اعمال بار ۲۰۰ گرم به مدت ۱۵ ثانیه اندازه گیری شـــد. تســـت کشش در دمای محیط توسط یک ماشین کششی SANTAM

150 با نرخ کرنش ۰,۰۰۳s^{-1} انجام شد. ابعاد نمونه های آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8-04 بود و شکل (۴) اندازه و پیکربندی نمونه کششی جوشکاری شده را نشان می دهد.



شکل ۴ نمونه جوشکاری شده و نمونه کشش وایرکات شده از محل جوشکاری

نتایج و بحث

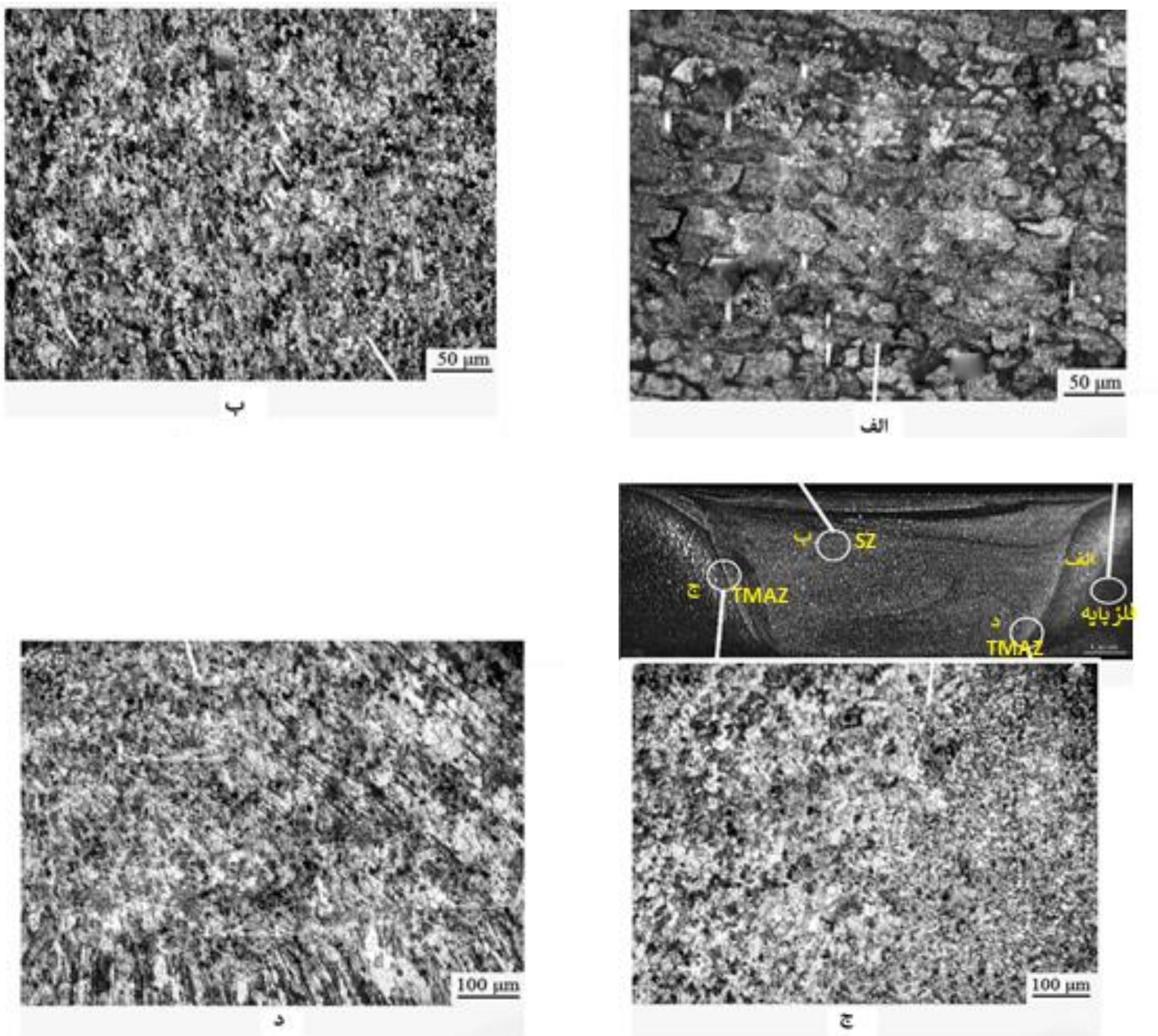
مطالعات ریزساختاری

بر این اساس، سه ناحیه مختلف در یک مقطع FSW قابل تشخیص است که به نام‌های منطقه همزده (SZ)، منطقه تحت تأثیر حرارت مکانیکی (TMAZ) و منطقه تحت تأثیر حرارت (HAZ) نامیده می شوند. شکل (۵) تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع سطح جوش داده شده پس از چهار پاس را نشان می دهد و مناطق مختلف را متمایز می کند. تغییر شکل شدید پلاستیک و گرمای ایجاد شده توسط اصطکاک در حین فرآیند همزدن اصطکاکی، ریزساختار تبلور مجدد با دانه‌های بسیار ریز در SZ ایجاد می‌کند. این منطقه معمولا به عنوان منطقه تبلور مجدد یافته دینامیکی شناخته می شود. منطقه هم زده در شکل (۵-ب) نشان داده شده است. معمولا چگالی کم نابجایی در دانه های تبلور مجدد یافته وجود دارد [21,22]. با این حال، تعداد کمی از محققان وجود دانه های تبلور مجدد را در SZ گزارش کردند که حاوی تراکم بالایی از مرزهای ریزدانه و نابجایی در این مناطق است [23]. فرآیندهای هم زدن اصطکاکی منجر به ایجاد یک منطقه انتقالی، منطقه متاثر از حرارت و منطقه تحت تأثیر حرارت مکانیکی بین ماده پایه و SZ می شود که در شکل (۵-ج) و (۵-د) نشان داده شده است. ناحیه TMAZ با دما و تغییر شکل در حین فرآیند هم زدن اصطکاکی افزایش می یابد [24]. اگرچه تغییر شکل در TMAZ اعمال می شود، اما به دلیل کرنش ناکافی، تبلور مجدد در این ناحیه رخ نمی دهد. با این حال، انحلال برخی از این رسوبات در این منطقه به دلیل قرار گرفتن در معرض دمای بالا در طول فرآیند مشاهده می شود [25,26]. علاوه بر این، نشان داده شده است که در TMAZ، دانه ها معمولا دارای تراکم بالایی از مرزدانه هستند [25].

در مورد جوشکاری بدون حضور ذرات تقویت کننده، تنها عامل موثر دما یا حرارت ورودی است. یک راه موثر برای کاهش اندازه دانه ها استفاده از مکانیسم کوئنچ است. در مورد جوشکاری با ذرات تقویت کننده، تشکیل ریز ساختار متفاوت است. از یک طرف، گرمای ورودی اندازه دانه ها را افزایش می دهد. از سوی دیگر، وجود ذرات تقویت کننده نانو مانند یک سد سخت به عنوان مانعی در برابر رشد دانه ها عمل می کند و از رشد بیشتر دانه ها جلوگیری می کند و این پدیده به «قفل شدن» معروف است.

این یک روش اصلاح دانه و یک عامل کلیدی برای کاهش اندازه دانه نمونه جوش داده شده با ذرات تقویت کننده است. متوسط دانه بندی در ناحیه جوش در جدول (۲) ارائه شده است. متوسط اندازه دانه آلیاژ پایه ۵۰ میکرومتر می باشد که پس از یک بار عبور بدون تقویت به ۲۵ میکرومتر کاهش می یابد. با افزودن نانوذرات WS2 و با افزایش تعداد پاس، اندازه دانه بیشتر کاهش می‌یابد که برای نمونه چهار پاسی به ۱۲ میکرومتر می‌رسد. دلیل این کاهش بیشتر اندازه دانه این است که با انجام جوشکاری در گذرهای بیشتر، احتمال تجمع ذرات تقویت کننده کاهش می یابد و باعث می شود که ذرات به طور همگن توزیع شوند و قفل شدن بهتری رخ دهد. بنابراین از رشد دانه ها و تشکیل دانه های درشت جلوگیری می کند. لازم به ذکر است که ذرات کوچکتر بر اثر قفل شدن موثرتر هستند

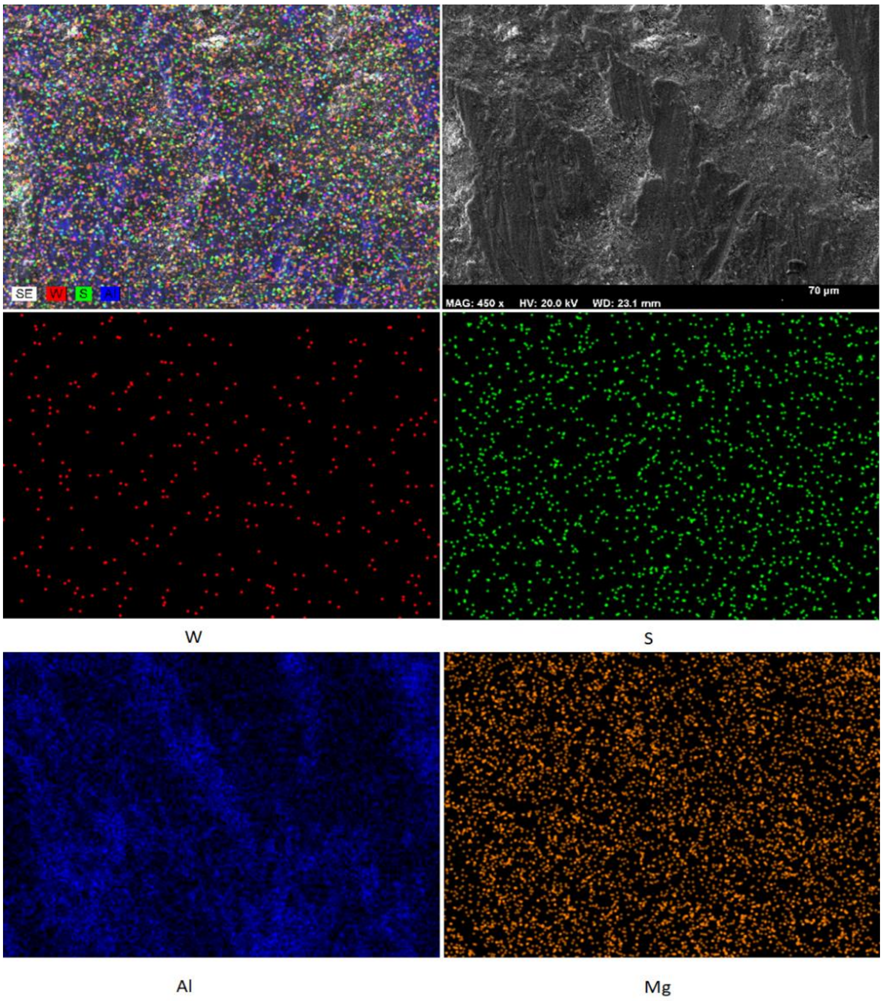
[12]. شـکل (۶) یک تصـویر میکروسـکوپ الکترونی از نمونه جوش داده شـــده را پس از چهار پاس نشـــان می د هد. همانطور که مشــاهده می شــود، توزیع ذرات در ســطح همگن است و این امر بر ریز ساختار و خواص مکانیکی نتیجه مطلوبی دارد.



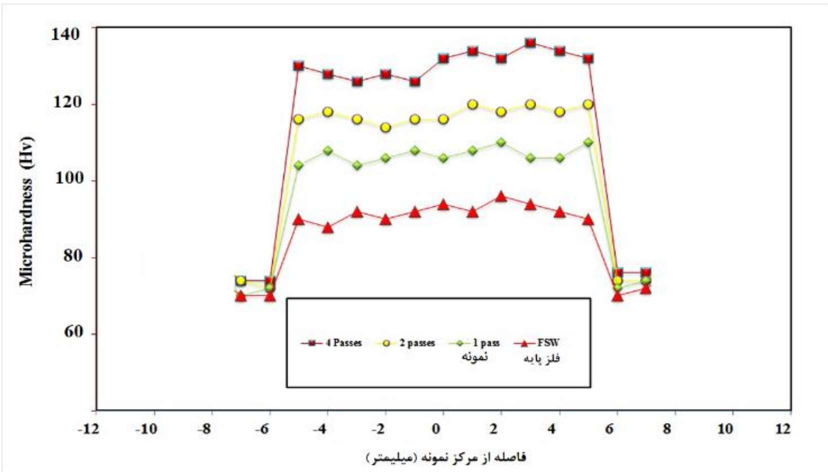
شکل ۵ تصویر مقطعی از نمونه جوشکاری شده با چهار پاس (الف) فلز پایه، (ب) منطقه هم زدن (SZ)، (ج) و (د) منطقه تحت تاثیر مکانیکی حرارتی (TMAZ)

جدول ۲ اندازه دانه متوسط نمونه های جوشکاری شده

Sample	Grain Size (µm)
BM	50
one pass without powder	25
WS_2 particle- one Pass	18
WS_2 particle- two Pass	14
WS_2 particle- four Pass	12



شکل ۶ تصویر FESEM و آنالیز EDS از نانوصفحات WS2 موجود در سطح نمونه جوشکاری شده بعد از ۴ پاس



شکل ۷ پروفیل سختی نمونه بعد از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

آزمایش سختی

شکل (۷) مشخصات میکروسختی را در امتداد ضخامت میانی در سطح مقطع FSW برای نمونه های مختلف نشان می دهد. حداکثر سختی ۱۳۵ Hv در ناحیه ای به عرض ۱۰ میلی متر در اطراف خط مرکزی جوش برای نمونه با چهار پاس و با نانوذرات WS2 مشاهده شد. این سختی مطابق با انتهای ناحیه SZ و ابتدای

ناحیه TMAZ است. سختی در ناحیه اتصال که یک کامپوزیت پایه آلومینیومی است به اندازه دانه، چگالی نابجایی، نانوذرات تقویت کننده و حرارت ورودی در این ناحیه بستگی دارد. با توجه به معادله هال–پچ، مقدار سختی با کاهش اندازه دانه افزایش می یابد [27]. به عبارت دیگر، سختی با اندازه دانه رابطه معکوس دارد.

نابجایی هایی که در نتیجه توزیع همگن نانوذرات در فلز ایجاد می شود منجر به افزایش سختی می‌شوند. ذرات تقویت کننده بیشتر روی سختی اثر می گذارند زیرا ذرات سختی بالایی دارند و ردپای ناشی از قفل زدن منجر به افزایش سختی می شود [28]. در مناطق مختلف نمونه، درجه سختی در ناحیه همزده به دلیل وجود نانوذرات، کاهش دانه بندی و مقدار تغییر شکل پلاستیکی بیشتر از هر ناحیه دیگری است و این ناحیه دارای چگالی ذرات ریز بالاتری نسبت به بقیه مناطق است.

با افزایش تعداد پاس ها، سختی در مناطق دیگر نمونه افزایش می یابد که به دلیل توزیع بهتر نانوذرات در سطح آلومینیوم است. بهترین نتیجه برای نمونه چهار پاس است که سختی آنها در مقایسه با فلز پایه حدود Hv ۳۵ افزایش یافته است. با توجه به مقدار ریزسختی، سختی با افزایش فاصله از TMAZ کاهش یافت. در منطقه متاثر از حرارت (HAZ) مقدار ریزسختی به دلیل رشد دانه کاهش یافت.

آزمایش کشش

آزمایش کشش برای به دست آوردن مقاومت تسلیم، استحکام کششی و ازدیاد طول فلز پایه و نمونه های جوش داده شده استفاده می شود [29]. جدول (۳) نتایج آزمایش کشش نمونه های جوش داده شده را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود استحکام کششی در نمونه های حاوی ذرات تقویت کننده نسبت به نمونه های بدون پودر افزایش یافته است. بهترین نتایج در نمونه های جوشی متعلق به نمونه چهار پاسی است که در آن استحکام به دست آمده نسبت به نمونه بدون پودر حدود MPa ۵۲ افزایش یافته است. به طور کلی سازوکار های تقویتی نمونه های حاوی ذرات تقویت کننده عبارتند از [30,31]:

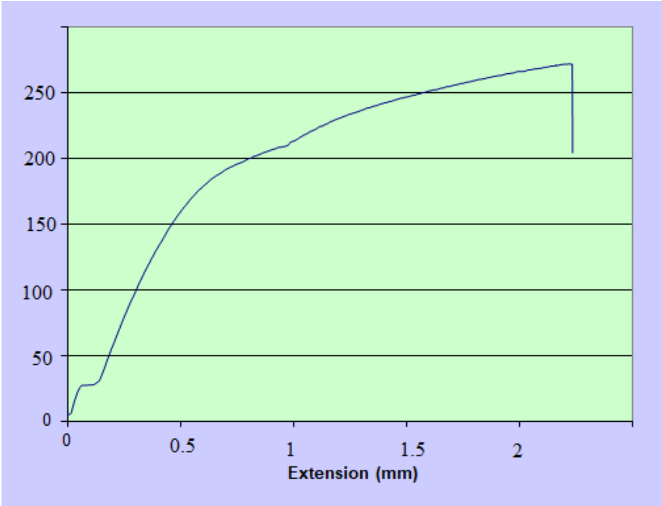
۱. مکانیزم اوروان
۲. اندازه دانه
۳. سختی ناشی از نابجایی های ایجاد شده توسط تفاوت در انقباض حرارتی بین ذرات تقویت کننده و فلز پایه
۴. کار سختی به دلیل اختلاف کرنش بین ذرات تقویت کننده و فلز پایه

شکل (۸) نتایج تست کشش برای نمونه پایه را نشان می دهد.

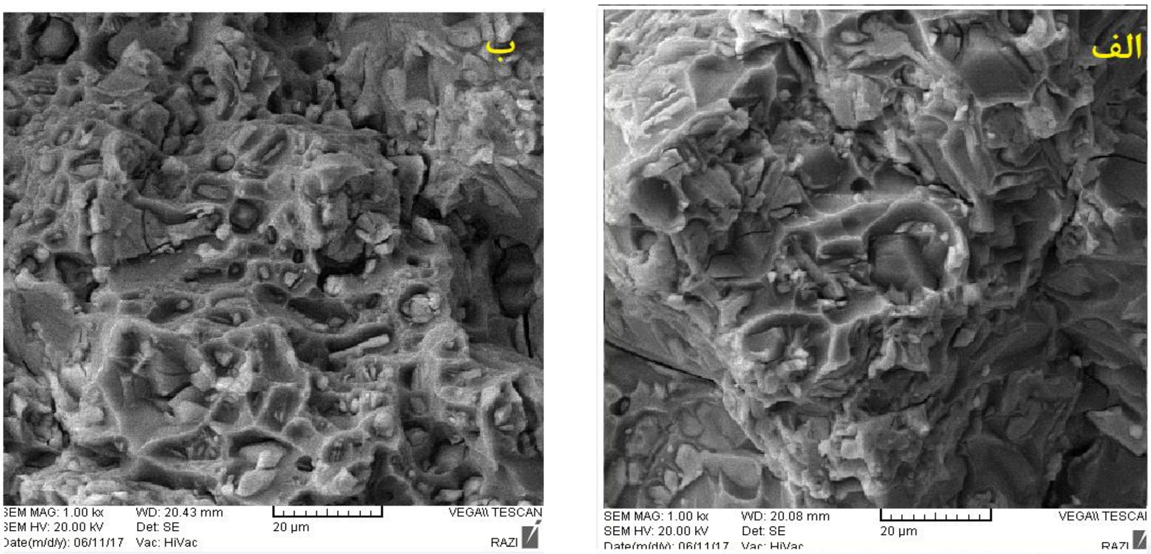
شکل (۹) سطح شکست نمونه های کششی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود شکست در نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده بدون استفاده از نانوصفحات WS2 و نمونه چهار پاسی شکل پذیر است. اما یک تفاوت قابل مشاهده بین آنها وجود دارد; اندازه حفره ها در سطح نمونه های چهار پاس ریزتر از نمونه بدون پودر است و همچنین پخش بهتر ذرات تقویت کننده در این نمونه باعث افزایش خواص مکانیکی نمونه می شود.

جدول۳ نتایج کشش نمونه های جوشکاری شده در شرایط مختلف

نمونه جوشکاری شده	استحکام نهاییMPa	ازدیاد طول (٪)
نمونه پایه (یک پاس بدون نانوصفحه)	۲۵۱	۲۷
۲ پاس بدون نانوصفحه	۲۶۹	۲۳
۴ پاس بدون نانوصفحه	۲۸۵	۱۹
یک پاس با نانوصفحه	۲۶۸	۲۲
۲ پاس با نانوصفحه	۲۸۱	۲۱
۴ پاس با نانوصفحه	۳۰۲	۱۸



شکل ۸ نمودار تست کشش برای نمونه پایه



شکل ۹ سطح شکست نمونه های (الف) پایه و (ب) ۴ پاس بعد از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

نتیجه گیری

در این مطالعه، اثرات تعداد پاس جوش بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصـــالات جوش لب به لب آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ جو شکاری ا صطکاکی اغت شا شی شده با افزودن نانو صفحات WS2 به شیار جوش برر سی شده ا ست. ریز ساختار و خواص مکانیکی مانند ا ستحکام ک ش شی و ریز سختی برر سی شده و نتایج زیر به دست آمده است:

۱. حداکثر مقدار ســـختی در کل نمونه با ناحیه تغییر شـــکل مکانیکی یافته اخت صاص دارد که با کاهش اندازه دانه، مقادیر سختی افزایش می یابد.

۲. در نمونه های جوشکاری بدون پودر تقویت کننده، حداقل مقدار سختی و استحکام به دست می آید اما با افزودن نانوذرات تقویت کننده، خواص مکانیکی بهبود یافته است.

۳. مقدار سختی و استحکام کششی با افزایش تعداد پاس جوش افزایش یافته و بیشـــتر از نمونه ای اســـت که بدون نانو پودر جوش داده شده است. دلیل آن توزیع یکنواخت تر ذرات در زمینه و شرایط قفل شدن ا ست که باعث کاهش اندازه دانه می شود. بهترین نتیجه به نمونه ای ن سبت داده می شود که توسط چهار پاس جوش داده شده است.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] N. Kumar, W. Yuan, S. Rajiv, and Mishra, Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials, 1nd ed, *Elsevier*, 2015, https://doi.org/10.1016/C2014-0-01707-8

[2] W. Thomas, "Friction stir butt welding, International Patent Application," International Patent Application PCT/GB92, Patent Application GB9125978.8, 6, December 1991.

[3] R. S. Mishra, and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing, " *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50, no. 1-2, pp 70–78, 2005. https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001

[4] N. Mathan Kumar, S. Senthil Kumaran, and L. A. Kumaraswamidhas, "Aerospace application on Al 2618 with reinforced – Si3N4, AlN and ZrB2 in-situ composites, " *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 672, no. 1, pp 238–250, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.02.155

[5] R. K. Uyyuru, M. K. Surappa, and S. Brusethaug, "Tribological behavior of Al-Si-SiCp composites/automobile brake pad system under dry sliding conditions," *Tribology International*, vol. 40, no. 2, pp. 365–373, 2007. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.10.012

[6] P. Cavaliere, "Mechanical properties of friction stir processed 2618/Al2O3/20p metal matrix composite," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 36, pp. 1657–1665, 2005. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.03.016

[7] P. Cavaliere, E. Cerri, L. Marzoli, and J. D. Santos, "Friction stir welding of ceramic particle reinforced aluminum based metal matrix composites," *Applied Composite Materials*, vol. 11, no. 4, pp. 247–258, 2004. https://doi.org/10.1023/B:ACMA.0000035478.71092.ec

[8] K. Nakata, S. Inoki, Y. Nagano, and M. Ushio, "Friction stir welding of Al2O3 particulate 6061 Al alloy composite," *Materials Science Forum*, vol. 426-432, no. 4, pp. 2873–2878, 2003. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.426-432.2873

[9] L. Ceschini, I. Boromei, G. Minak, A. Morri, and F. Tarterini, "Effect of friction stir welding on microstructure, tensile and fatigue properties of the AA7005/10vol % Al2O3p composite," *Composites Science and Technology*, vol. 67, no. 3-4, pp. 605–615, 2007. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.07.029

[10] H. Uzun, "Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminum alloy matrix composite," *Materials & Design*, vol. 28, no. 5, pp. 1440–1446, 2007. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.03.023

[11] L. M. Marzoli, A. V. Strombeck, J. F. D. Santos, C. Gambaro, and L. M. Volpone, "Friction stir welding of an AA6061/Al2O3/20p reinforced alloy," *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 2, pp. 363–371, 2006. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.04.048

[12] K. A. A. Hassan, A. F. Norman, D. A. Price, and P. B. Prangnell, "Stability of nugget zone grain structures in high strength Al-alloy friction stir welds during solution treatment," *Acta Materialia*, vol. 51, no. 7, pp. 1923–1936, 2003. https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00598-0

[13] M. Saeidi, M. Barmouz, and M. K. Besharati Givi, "Investigation on AA5083/AA7075+Al2O3 Joint Fabricated by

Friction Stir Welding: Characterizing Microstructure, Corrosion and Toughness Behavior," *Materials research*, vol. 18, no. 6, pp. 1156-1162, 2015. https://doi.org/10.1590/1516-1439.357714

[14] A. H. Feng, B. L. Xiao, and Z. Y. Ma, "Effect of microstructural evolution on mechanical properties of friction stir welded AA2009/SiCp composite," *Composites Science and Technology*, vol. 68, no. 9, pp. 2141–2148, 2008. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.03.010

[15] H. Lombard, D. G. Hattingh, A. Steuwer, and M. N. James, "Optimising FSW process parameters to minimise defects and maximise fatigue life in 5083-H321 aluminium alloy," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, no. 3–4, pp. 341–354, 2008. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.01.026

[16] H. Bisadi, A. Tavakoli, M. Tour Sangsaraki, and K. Tour Sangsaraki, "The influences of rotational and welding speeds on microstructures and mechanical properties of friction stir welded Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints," *Materials & Design*, vol. 43, no. 1, pp. 80–88, 2013. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.029

[17] M. Grujicic, G. Arakere, B. Pandurangan, A. Hariharan, C. F. Yen, B. A. Cheeseman, A. P. Reynolds, and M. A. Sutton, "Computational analysiss of material flow during friction sitr welding of AA5059 aluminum alloy," *Journal Mater. Eng. Perform*, vol. 21, no. 9, pp. 1824-1840, 2012. https://doi.org/10.1007/s11665-011-0069-z

[18] I. Shigematsu, Y. J. Kwon, K. Suzuki, T. Imai, and N. Saito, "Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding," *Journal of Materials Science Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 353–356, 2003. https://doi.org/10.1023/A:1022688908885

[19] M. S. Han, S. J. Lee, J. C. Park, S. C. Ko, Y. B. Woo, and S. J Kim, "Optimum condition by mechanical characteristic evaluation in friction stir welding for 5083-O Al alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 19, no. 1, pp. 17–22, 2009. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60238-5

[20] J. J. S. Dilip, M. Koilraj, V. Sundareswaren, G. D. Janaki Ram, and S. R. Koteswara Rao, "Microstructural characterization of dissimilar friction stir welds between AA2219 and AA5083," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 63, no. 3, pp. 757–64, 2010. https://doi.org/10.1007/s12666-010-0116-8

[21] G. Liu, L. E. Murr, C. S. Niou, J. C. Mclure, and F. R. Vega, "Microstructural aspects of the friction stir welding of 6061-T6 aluminum," *Scripta Materialia*, vol. 37, no. 1, pp. 355-361, 1997. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(97)00093-6

[22] Y. S. Sato, H. Kokawa, M. Enomoto, and Sh. Jordan, "Microstructural evolution of 6063 aluminum during friction stir welding," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 30, no. 9, pp. 2429-2437, 1999. https://doi.org/10.1007/s11661-999-0251-1

[23] F. J. Humphreys, and R. Priestner, "Fine-grained alloys by thermomechanical processing," *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 5, no. 1, p. 15-21, 2001. https://doi.org/10.1016/S1359-0286(00)00020-6

[24] J. Q. Su, T. W. Nelson, R. S. Mishra, and M. Mahoney, "Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminum," *Acta Materialia*, vol. 51, no. 3, pp. 713-729, 2003. https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00449-4

[25] K. V. Jata, K. K. Sankaran, and J. J. Ruschau, "Friction-stir welding effects on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7050-T7451," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 31(9), pp. 2181-2192, 2012. DOI:

10.1007/s11661-000-0136-9

[26] A. Shamsipur, S. F. Kashani-Bozorg, and A. Zarei-Hanzaki, “The effects of friction-stir process parameters on the fabrication of Ti/SiC nanocomposite surface layer,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 206, no. 6, pp. 1372-1381, 2011. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.08.065

[27] K. Y. Wang, T. D. Shen, M. X. Quan, and W. D. Wei, “HalI-Petch relationship in nanocrystalline titanium produced by ball-milling,” *Journal of Materials Science Letters*, vol. 12, no. 1, pp. 1818-1820, 1993. https://doi.org/10.1007/BF00539997

[28] A. Dolatkhah, P. Golbabaei, M. K. Besharati Givi, and F. Molaiekiya, “Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing,” *Materials & Design*, vol. 37, no. 1, pp. 458- 464, 2012. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.035

[29] Dieter, George Ellwood, Mechanical metallurgy, 3rd Ed, New York, McGraw-Hill, , 1994. DOI: 10.4236/jss.2014.25011.

[30] S. Shahraki, S. Khorasani, R. Abdi Behnagh, Y. Fotouhi, and H. Bisadi, “Producing of AA5083/ZrO2 Nanocomposite by Friction Stir Processing (FSP),” *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 44, no. 6, pp. 1546-1553, 2013. https://doi.org/10.1007/s11663-013-9914-9

[31] C. Maxwell Rejil, I. Dinaharan, S. J. Vijay, and N. Murugan, “Microstructure and sliding wear behavior of AA6360/(TiC + B4C) hybrid surface composite layer synthesized by friction stir processing on aluminum substrate,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 552, no. 1, pp. 336–344, 2012. https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.05.049

[32] M. Raaft, T. S. Mahmoud, H. M. Zakaria, and T. A. Khalifa, “Microstructural, mechanical and wear behavior of A390/graphite and A390/Al2O3 surface composites fabricated using FSP,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 18, pp. 5741–5746, 2011. https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.097

[33] M. Raturi, and A. Bhattacharya, “Electrochemical corrosion of AA6061-AA7075 double sided FSW joints prepared with and without secondary heating,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 38, pp. 590-612, 2022. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.06.002

[34] D. G. Andrade, C. Leitão, N. Dialami, M. Chiumenti, and D. M. Rodrigues, “Modelling torque and temperature in friction stir welding of aluminium alloys,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 182, pp. 105725, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105725

[35] R. Prasad Mahto, and S. Kanta Pal, “Friction Stir Welding of Dissimilar Materials: An Investigation of Microstructure and Nano-Indentation Study,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 55, pp. 103-118, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.03.050

[36] M. Raturi, and A. Bhattacharya, “Temperature variation and influence on local mechanical properties assessed by nanoindentation in AA6061-AA7075 dissimilar FSW,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 148, pp. 107079, 2023. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107079